

教育神経科学の進展と数理パズル

田 中 航 二

1. はじめに

インターネットやマルチメディアの普及により、多量の情報に容易にアクセスでき、強力な検索機能を有した Google や Yahoo などの検索サイトが知識活用を容易にしている。そのため、教育手法や学習形態も従来の知識吸収型学習から脱皮し、取得情報を活用し新しい着想を得ることのできる創造型学習への転換の必要性が一層増しつつある¹⁾。

この創造型学習をどのような形で教育現場にて実践するかについて多くの努力がなされている。その一つの試みとして「パズル²⁾」を採り入れた、教育実践が幼児教育に始まり、小学校、中学校、高等学校、大学など多くの教育現場にて多用されている。この「パズル」の教育効果の向上への貢献については多くの肯定的な評価がなされている。とりわけ、大きな効果の一つとして、個人の有する知的好奇心を触発・促進し、集中力と根気を養うとされている³⁾。

わが国は、多数の「パズル」作成者や「パズル」ファンが存在するパズル大国である。「パズル」関連の良書・論文も多数刊行されている^{4) 5) 6) 7)}。また脳科学者による「脳トレ」や「パズル」のもつ効果に関連した考究が存在する。それらは、飛躍的な進展を遂げている脳内イメージング機器の活用による「脳内活動の可視化」である⁸⁾。つまり、パズルを解くという作業を自発的に行うあるいは他動的にあたえられた時、一連の作業を「脳・神経」系の脳内変化として画像で観測して、パズルのもつ効果を評価していることになる。

他方、ここ数十年で脳科学と教育を結びつけた「教育神経科学」が大きな広がりを見せている^{9) 10) 11)}。これらの研究も、最近著しい進歩を見せている f-MRI (functional Magnetic Resonance Imaging) などによる脳断面の画像解析により、作業中の脳の観察により、教育にとって重要な意味を持つ知覚や認知、情動の各機能が明らかになって

きている．また，教育付随活動に対応して活発な変化を示す脳部位をより精確に特定することが可能になったからである¹²⁾．それらの考究には，脳・神経科学，教育学にとどまらず心理学などの周辺科学を含む学際研究であり，国際的な規模での共同研究として，OECD（Organization of Economic Cooperation and Development 経済協力開発機構）で遂行され多くの知見が得られている．それらの知見から「脳科学」と教育活動に関連する「教育・学習科学」の連携の必要性が指摘されている^{13) 14)}．

以上，本稿では近年の脳科学あるいは神経科学の飛躍的な進展と同時に大きな進歩を見せている「教育神経科学」に関連してなされた成果に着目する．次に「脳科学・神経科学」，「教育」に付加して「数理パズルの効果」の3つのキーワードを基にして，教育に「数理パズル」を如何に活用できるかについて考究する．最初に一般的な「問題解決」の4ステップについて述べ，「数理パズル」解決時に特に必要とされる「閃き」に関連した「脳科学」の知見「アハ！反応」について概観する．次に「数覚」，この数覚とは「生まれつき数を取り扱う能力」という意味である．「数覚」についての知見と数的能力の形成に関して調べ，算数・初等数学の教授法の構築や算数・初等数学の理解に必要な学習経路についても概観する．さらに，PISA テストなどにみられる国際比較を基にして，日本人学生の共通の弱点についても考える．それら弱点の克服に「数理パズル」の寄与がどの程度見込めるかも考究の対象とする．

2. 「パズル」と関連する「教育神経科学」の成果

パズルがどのような役割や貢献をするかについて，パズルを解くという行為は，脳・神経システムへの刺激入力と考えられ，その刺激入力を経て脳・神経システムが示す変化を体現する応答・出力にみられる特性を計測することで効能を評価できる¹⁵⁾．この外部出力が教育的行為に基づく応答であるとき，「パズル」の教育への貢献と言い換えることもできる．このため以下には近年多くの成果がみられる脳・神経科学の教育への貢献に関連する文献をもとにし，パズルとその「問題解決」との関連を含め考究する．

近年の脳・神経科学の飛躍的な進歩により，幼児教育，語学教育や高齢者の知的能力維持など「教育」と「学習の科学」に関連して，多くの考究が積極的になされるようになってきた．心理学，教育学および脳科学の学際的な見地からの考究も飛躍的に進展し

てきた．この脳科学の教育への貢献を可能にしたのは，小泉¹⁶⁾によると「身体を傷つけたり害を与えたりしない非侵襲高次脳機能描画法として，機能的磁気共鳴描画法（f-MRI : functional Magnetic Resonance Imaging）や近赤外分光トポグラフィ法（NIRS-OT : Near Infrared Optical Topography）などが多用されるようになったことが，人文・社会科学に神経科学が応用される大きな契機を創った」とされる．以下に，関連する最新の知見について概観する．

2.1 問題を解くための手順

ランダムハウス英和辞典によると，puzzle とは，〈人・頭・心を〉（・・・で）悩ますという意がある．これらの「難問」を解決するには順序立てて考えることで解決が容易になる場合がある．「パズル」も同様で，「（与えられたパズル）問題の解決」という観点から見直してみよう¹⁷⁾．通常参照される，ポリヤ¹⁸⁾による問題解決の4つのステップに分け実践する手法を試みよう．以下に（芳沢の解説書¹⁹⁾）をもとに，4つのステップとその内容を引用して示す．

第1ステップ「問題を理解すること」

問題がなんであるのか（問題の定義），何が原因になっているのか（原因の特定）を分析する．そこで考えられる原因はすべて列挙する．

第2のステップ「計画をたてること」

問題の原因について，それぞれ「可能性のある解決策を列挙」して，「ベストの解決を選択する」作業を行う．解決方法には，一部の解決と永久的解決があることに留意する．

第3のステップ「計画を実行すること」

計画を着実に実行に移す．「勤勉は成功の母」，「思う念力岩をも通す」という諺を信じて，弱気にならずに努力する．

第4のステップ「ふり返ってみること」

解決策を実行後，問題が解決したかどうかの評価を行う．問題が解決した場合はこれで終了となる．未解決の部分が残った場合，原因の特定が正しかったのか，解決策に不備がなかったのか，などを見直す．そして再び第2のステップに戻り，別の解決策を考え，実行し（第3のステップ），その後また評価し（第4のステップ），問題が解決するまで続ける．

以上は芳沢²⁰⁾からの引用であるが、「パズル」を解き、「パズル問題を解決」する際には上述の4つのステップを何らかの形で実践していることになる。「パズル」問題で各ステップを明確に分離して区分し、対応関係を明示することは難しいが、各ステップの重要度という点ではおのずから軽重を明示できる。そのステップの重要度で最も高いのは、第1のステップ「問題を理解すること」である。つまり、問題がなんであるのか（問題の定義）を分析することである。これは「パズル」問題に隠された意図を探り出す作業である。この「隠された意図」の探索に成功すれば「パズル」の解の導出、つまり「問題の解決」に結びつくことができる。この際、いわゆる「閃き（ひらめき）」の脳内での発現がみられることになる。この後、第2のステップおよび第3のステップを経由し、第4のステップとしての、パズルの正解に到達したときは一種の感激を感じるであろう。この時、正解に到達せずとも、何らかの感懷を抱くことになる。

2.2 パズルを解く際の「アハ体験」

「パズル」を「問題の解決」する過程で最も高い重要度を示すのは、第1のステップ「問題を理解すること」である。問題がなんであるのか（問題の定義）を分析することであるとした。問題に隠された意図を探り出せば、かなりの「パズル」を「問題の解決」に結びつくことができることも前述した。この際、いわゆる「閃き（ひらめき）」が脳内に発現することが重要である。この過程と「脳内脳活動」との結びつきを以下にみよう。

パズルを解くという行為は、脳・神経システムへの刺激入力と考えられ、その刺激入力を経て脳・神経システムが示す変化を画像出力で計測することができると述べた。この刺激を「パズル」の形態で受けた時、一種の驚きと緊張が発現する。その後「問題」を解くときに「アハ！反応」が惹起される。「この時『アハ！反応』とは、閃きのように『瞬時に理解が訪れる』特別な思考過程と考えられている。この過程では、解に到達しない『固着』が長く続くが、思考の見通しや展望に予期しない変化が起き、難問の解が突然閃く（＝洞察）ように理解される。この時、『アッ！』『エー』という声を発してしまうほどの感動が起こることが知られており、これが『アハ！反応』と呼ばれている²¹⁾。」「パズル」を解くという行為はこのような「アハ！反応」をとこなう。この「アハ！反応」に着目した仁木の研究²²⁾を概観する。

仁木²³⁾は「現代の教育では『生徒の主体的な経験・行為をとおした学び』を構成的

学習 (Connective Learning) として重要視している。生徒の主体的な行為や感情を構成的学習では重要視するが、その自由は『ヒト行為の学習』の性質としてよりよく理解できる」とある。ここでの『ヒト行為』は『意図をもった学習』を意味し、ヒト固有のものと考えられている。「この『行為の学習』を自分自身で行うこと、さらには、意図的に一生懸命に行うことにより、この『行為の記憶』が強固に成立することが知られている」とあり、「この行為の記憶は、行為の内容についてのエピソード記憶である」とされている。この『エピソード記憶』は、「現象的には重要であるが、理論的に独立の立場を確立できず、解明できない記憶システムとなっている。同様に『行為の学習』も、心理学、脳科学、教育科学的に十分解明されていない」とある。この『エピソード記憶』の提唱者はタルピングとされるが、「エピソード記憶の基礎づけを脳科学に求め、脳の上に成り立つ『こころのシステム』としてエピソード記憶を研究するべきであると提言した」とある。仁木らは「この提言にインスピレーションを受け『行為の学習・記憶』システムの研究を目指した。このエピソード記憶に関与する脳部位は多々あるが、共通し、かつ不可欠な脳部位は、記憶の中核『海馬』であると」し、そこに注目して一連の研究がなされたようである。

仁木らは「記憶の中核『海馬』と『行為の記憶・学習』、さらには高次認知機能との関係を一連のイメージング研究として追求」し、下記のような事柄を世界に先駆けて明らかにした。

実験 1．自伝的記憶の海馬傍回における経時的活動変化の検出

実験 2．目的をもった意味記憶想起における海馬の寄与

実験 3．洞察 (インサイト) 時における海馬活動の検出

実験 4．洞察時の大脳前頭葉の役割

実験 5．時間的離散現象における海馬活動の検出

実験 6．視覚認識の再構成及び知識の再構成時における「こころの理論」脳領域活動の発見

である。

われわれの「パズル」の問題に関して、仁木²⁴⁾の実験 3 と実験 4 を採りあげ、以下に引用概観する。

「もっとも高度な認知機能の一つである洞察 (インサイト) において、海馬が動くかを実際に確かめ、『アハ！感動』を伴う瞬間に、同時に海馬が大きく活動していること

を示した。洞察には、過去の体験、知識の想起が必要で、多くの脳部位が同時に活動する必要がある。また『アハ！感動』を伴う現象は、その体験がよく記憶されることが知られている。このようにインサイト現象は『行為の学習・記憶』の極端な例とみられ、インサイト現象を実験的に起こし MRI 測定ができることにより、『行為の学習・記憶』の脳内活動典型例として調べる事が可能になった」との記述があり、

「…実験 4 では、『アハ！反応』に関する神経基盤』という題名で、洞察およびその前段階の脳前頭葉で起こっている洞察特有の現象解明をより詳細に調べた」とあり、この実験で用いられる素材として、「被験者に『なぞなぞ』を解いてもらう。なぞなぞ文は『その布が裂けたので、その干し草の山は、重要であった』というものである。なぞなぞ文は常識的に読むと、その意味が分からないという特徴がある。この問題文で、『干し草の山』および『布』の間の関係は、明白でない（なぜなら、被験者は『布』が何か着られるものを意味するともものと考えてるのがごく自然である）。この暗黙の思い込みは支配的であるので、他の方法でこの言葉や文章を解釈することが被験者にとって非常に難しい。…『パラシュート』で誘起される『アハ！反応』は『布』がパラシュートを意味し、それ故、干し草の山の役割は「落下を緩和する」ことであるという（正しい）代替解釈を誘発し、被験者はなぞなぞの解を瞬時に理解する」とある。

被験者が正解に到達するあるいは不正解であることにより、「『アハ！反応』試行の 72.90% で、『問題提示を読んだ最初の段階で、別の方向で解を考えていたことが失敗の原因であった』と被験者は報告している。このことは『こころの袋小路（Impass）を壊す』ことが『アハ！反応』の重要な要素であることを示唆している。また、『アハ！反応』の後では、この問題に対する『布をパラシュートとみなす』視点を獲得し、今までの知識（布は着るものを意味する）を再構成し新しい知識を学んでしまう。実際、一度問題をといた（あるいは答えを『アハ！反応』を伴って知った）あとでは、この『アハ！反応』はもはや起こらないのであると記述されている。

彼らの、『アハ！反応』の生成時におこる、事象関連（Event -Related）f-MRI 解析結果を以下のように述べている。SPM（Statistical Parametric Mapping）図が示され「『アハ！反応』中、ACC（前頭帯状回）および、左の外側前頭葉で有意な活動がみられる。しかし、ACC と左外側前頭葉の働きに違いがあり、ACC が問題解決過程における誤差検出と矛盾モニタリングに関連し、『アハ！反応』と強い相関を持つが、一方、左側側頭前葉は問題の困難度に関連しており、一般に概念の意味属性の選択メカニ

ズムとして役立っている．このように，洞察現象において，大脳前葉部のいくつかの領域が協調的に働く必要が明らかにされた」とある．

「アハ！反応」は単に「パズル」を解く際に発現するものではないが，「パズル」の解決作業に付随的にみられるものである．この一連の過程に関連する脳活動をモニタリングして評価解析することからパズルのもつ効能の一部を評価できる．以上，その際の脳活動の状況に重きを置いた仁木による研究成果を引用した．図1にヒトの大脳外側面および内側面を示す．海馬などの位置を図2に示す．但し，海馬，扁桃核，大脳基底核等の部位は大脳皮質の中に埋もれているため，外側から見えない．

図1．ヒトの大脳の外側面と内側面

（出典：甘利俊一監修・田中啓治編『認識と行動の脳科学』p.204，図5.1）

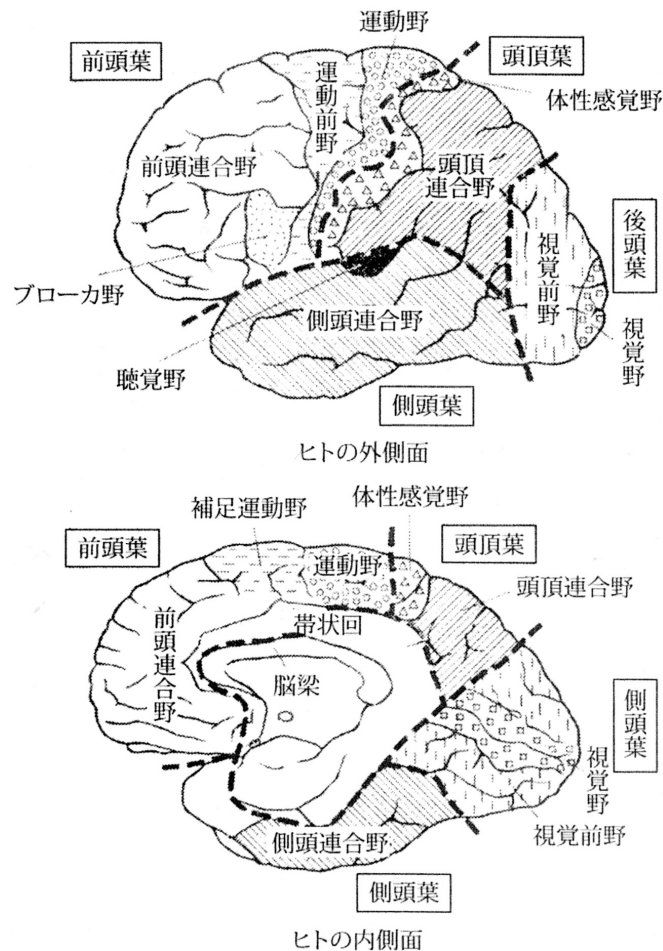
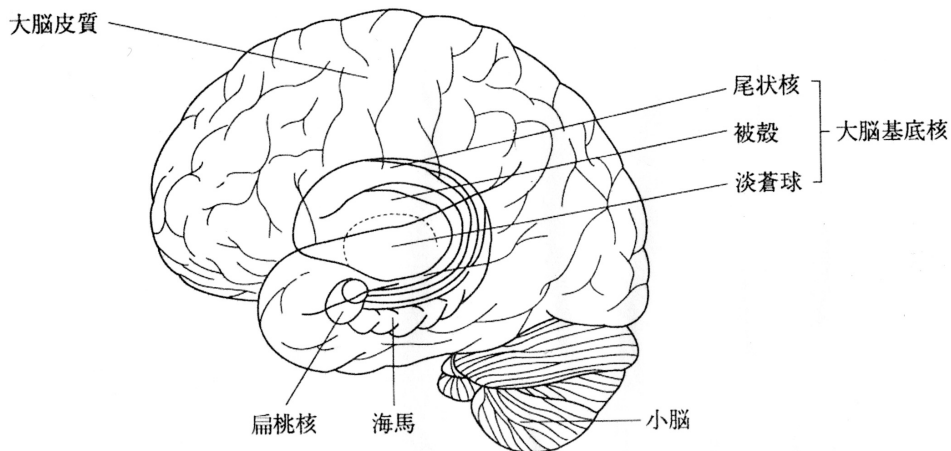


図2．海馬、扁桃核、大脳基底核の位置

(出典：甘利俊一監修・田中啓治編『認識と行動の脳科学』 p.205、図5.2)



坂井の著作²⁵⁾にも興味深い例が示されている．例題としては「ロンドン塔課題」が取り上げられている．図3に示す．その課題は「赤・青・緑のビーズ玉を1つずつ動かし，最少の移動回数で，ロンドン塔の正しい色順序に並び替えるというもの．」移動順序を考えるプランニングでは，頭頂連合野，前頭極（10野），前頭連合野の部位が活性化する．また「A君はB君より背が高い，B君はC君より背が高い，ではA君とC君はどちらが背が高いか」というような推論課題を与えると，前頭連合野が活性化するとされている．

3．数覚と教育神経科学について

「数覚 (number sense)²⁶⁾」について考え，「数理」パズルのとの関連について考究する．この数覚とは「生まれつき数を取り扱う能力」という意味である．われわれの目的は【数理】パズルを教育の問題に応用することにある．その際われわれが本然的に有する「数覚」を如何に刺激して，パズルの教育効果をいかに高めるかが重要となる．教育の対象は主として幼児，小・中・高等学校と大学生と広範囲にまたがり，高齢者の増加にともなう認知症対策なども広義の意味で関連する．

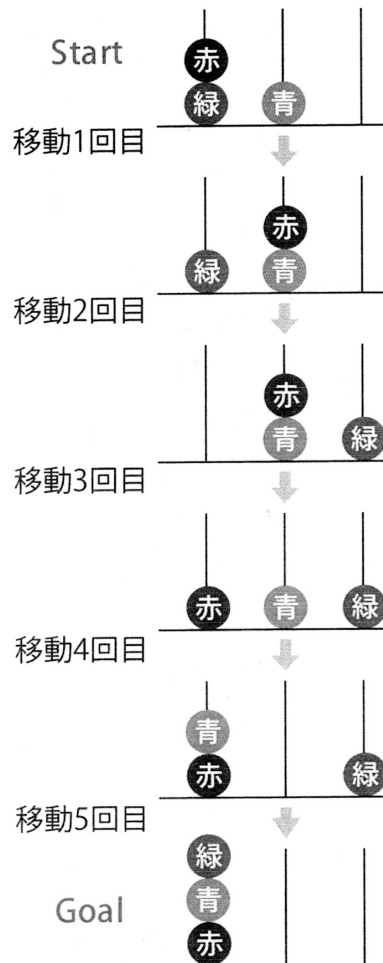
近年の脳科学の飛躍的な進展が²⁷⁾「数学教育に関連する重要な問いに答えられるようになってきた．そこでは，高度な数学の学習が脳にどのような影響をあたえることができるかについて答えることができたなら，非実用的な数学を学校で教える正当性があるかどうかについてわかるかもしれない．現代社会では入手できる知識は莫大であり，学校での限られた時間でこなすカリキュラムには限界がある．現在の脳科学研究は，基礎的な算数に焦点をあてている」とある．

数的能力の形成に関しては，算数の教授法の構築に関して脳科学の観点から，以下の2つの方法が挙げられている²⁸⁾．「第一に，生物学的要因を理解することで，生物学要因を基礎においた算数の指導法をつくることができる．第二に，さまざまな指導法が脳機能に与える影響を研究することで，算数の理解に必要な学習経路を明確にすることができる．こうした学習経路

がわかれば，教育現場において指導法のストラテジーが向上し，個人差を調節する別の学習経路が開発されるであろう．脳科学は，より効果的で包括的な算数教育の構築に可能性を与えることができる」とある．

興味深いのは幼児がかなりの数的能力を有しているという近年の研究である．その研究²⁹⁾によると，「赤ちゃんは数に関する能力を持たずに生まれるが，感覚で探りながら世界を発見していくと，長いこと考えられていた．ピアジュ (Piaget, 1952) の認知発達理論を含む，多くの重要な発達性理論は，幼い子どもの数に関する理解について軽視

図3．ロンドン塔課題（出典：坂井建雄・久光正監修『ぜんぶわかる脳の事典』p.128）



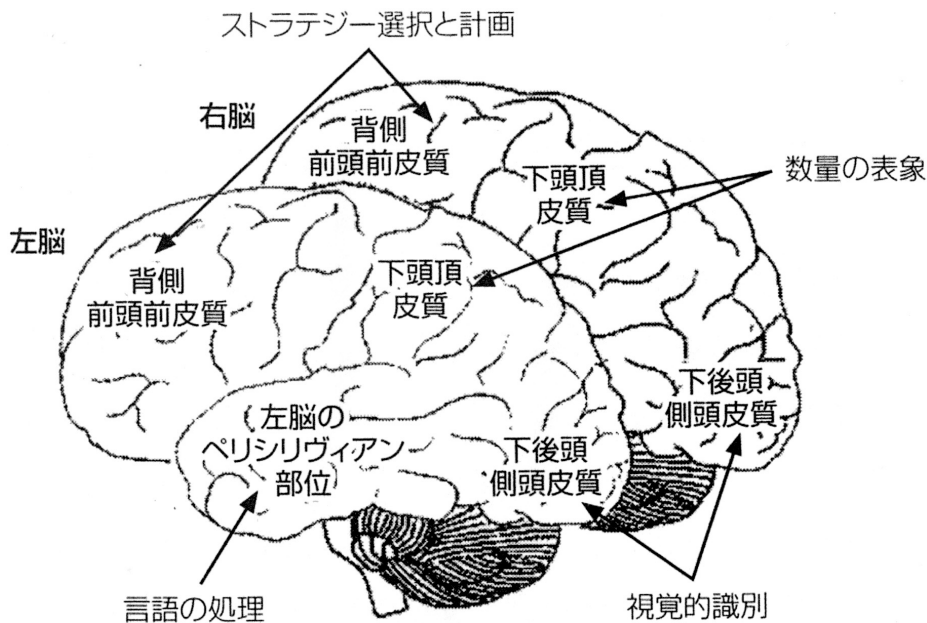
してきたのである」としている。しかし、「最近の研究で、赤ちゃんの脳には数的感覚が備わっていることが示された (Ferigenson, Dehaene and Spelke, Wynn, 1998)。赤ちゃんの脳には、数量の理解を可能にする二つの根本的な数のシステムが存在している (Xu, 2003)。最初のシステムは、『いち』『に』『さん』という数の概念であり、これらの数を正確に区別することができ、これらの数ともっと大きな数を正確に区別できる。さらに、赤ちゃんはこれらの数の抽象的概念、つまりモダリティーにとらわれない数の概念を理解している」とある。「…もう一つのシステムは概算である。赤ちゃんは、比較する割合が十分に大きいものであれば、数の大小を区別することができる。たとえば、『8』と『16』とは区別できるが、『8』と『9』は区別できない」とある。

赤ちゃんは³⁰⁾「意図をもって数の世界に触れていることがわかり、これは赤ちゃんが白紙状態であるという考えと違うことがわかる。赤ちゃんには進化的にみても数の感覚があり、それを知覚的道具として用いることで世界を数的に理解しているようである。」「…小さい子供は、正式な学校教育が始まる前に、すでに数に対する相当な理解の基盤を持っている。現代の算数の教授法の多くは、幼児の能力を過小評価している時代遅れの理論に基づいたものである。」「…子供が小さいころからすでに理解していることを利用することで、正式な学校教育において数的概念の理解を促進させることができる。さらに、象徴的な数的概念を現実の世界の理解に置き換えることは、概念としての理解と実施に必要な理解とを結びつけることに役立つ。この結びつきの構築こそ、数的能力の習得にとって重要なのである (Siegler, 2003)。」「…この研究が強く提言することは、日常的な数の理解と本能的な数の理解を踏まえた算数の指導法である」と記載されている。

脳における数的能力に関しても多くのことが明らかにされつつある。「赤ちゃんが生まれながらにして持っている数の感覚は、後頭葉に存在する可能性が高い」「…教育によって数的能力を高めることはできるが、数処理する認知能力の基盤は一生を通じてあまり変わらず保たれる。たとえば赤ちゃん、子ども、大人は、まったく同じ比率で数の区別をすることが報告されている (Cantlon 他, 2006)。最近の f-MRI 研究では、大人と就学前の子どもの脳において非象徴的な数の処理を遂行している神経基質 (または神経表面) は、頭頂間溝であることがわかっている。(Cantlon 他, 2006)」と記載されている。以上で、赤ちゃんに代表される『数覚』研究の概観を行った。成長とともにない、必然的に生じる脳内処理過程の変化も詳細に研究されつつある。

数の処理に関連すると考えられている大脳皮質領域を図4に転載する．下記に示す多くの課題にも精力的な研究がおこなわれている．神経細胞と数，下頭頂野と数覚，脳で計算を指揮するもの，数学的思考の局在はどこか，脳が掛け算をしたり，比較したりするとき，数の神経細胞などの考究等である．

図4．数の処理に関連している大脳皮質領域（出典：OECD 教育研究革新センター編著・小泉英明監修、小山麻紀・徳永優子訳『脳からみた学習』p.158、図5.1）



4．「パズル」は学習に有効か

われわれの目的は「数理パズル」を教育の問題に応用して，その教育効果をいかに高めるかにある．教育の対象を大学生に限定せず，幼児，小・中・高等学校と広い範囲を対象とする．上述の脳科学の成果は多くの示唆をわれわれに与えてくれる．特に学習面での示唆は重要でありその成果の検証・応用のためにどのような弱点が学生にみられるかを見極める必要がある．そのために近年行われた，OECDによる2012年の国際学習到達度調査（PISA2012と略称する）の結果が参考になる．ここでは15歳の学生が対象

となっている。

2012年の6月と7月に実施されたPISA2012の調査概要は下記である。

- (1) 義務教育終了段階の15歳児を対象に、知識や技能を実生活の様々な場面で直面する課題にどの程度活用できるかを評価。
- (2) 読解力、数学的リテラシー、科学的リテラシーの3分野について、2000年以降、3年ごとに調査を実施し、2012調査では数学的リテラシーを中心分野として重点的に調査。
- (3) 65か国・地域から約51万人が参加、我が国では、全国の高等学校、中等教育学校後期課程、高等専門学校の内、191校、約6400人が調査に参加。

朝日新聞によるとPISA2012の結果の概要は下記の様である³¹⁾。

「数学的リテラシー、読解力、科学的リテラシーの3分野すべてにおいて、平均得点が比較可能な調査回以降、最も高くなっている。また習熟度レベル別でも、2009年調査から引き続き、レベル1以下の下位層の割合が減少し、レベル5以上の上位層の割合が増加している。」これらの好結果に対して「文部科学省は学習指導要領の改訂や少人数制の普及など『脱ゆとり』の施策が好成績の要因とみる」と高い評価を行っている。

しかし、以下に述べるような問題点の指摘がある。「ただ課題もみえる。習熟度別の最上位層の割合は、数学は8%で、上海(31%)やシンガポール(19%)に劣る。」「…学力調査と同時に行われた『質問紙調査』。今回は『数学的リテラシー』を重点的に調査した。結果から見えるのは、数学に自信が持てない、日本の生徒の姿である。『数学についての本を読むのが好き』という質問に『まったくその通り』『その通り』と答えた生徒は17%。03年の調査に比べ4%ふえたが、シンガポール(68%)、上海(50%)に比べ低く、OECD平均の30%も下回った。数学に対する『不安』では約7割が『授業についていけないのでは』『ひどい成績をとるのでは』と感じていた。数学は将来の学びや仕事に役立つのか。『将来の仕事の可能性を広げてくれる』52%と、肯定的な回答は半数程度にとどまった。…」とやや数学授業についての悲観的な結果である。

さらに、朝日新聞別紙面³²⁾によると「…日本の学力の回復傾向は鮮明になった。『ゆとり教育』の見直しが大きな成果を及ぼしたと概ね肯定的評価が得られている。しかし、関連する『数学的リテラシー』に重点を置いたとき課題が残る。数学的リテラシーのテストで問われたのは、15歳の生徒がそれまで習った知識や技能を実生活に応用する能力。暗記力や計算力をほとんど問わないため、問題用紙には解答に必要な数学の公式

が掲載されており、生徒は受験中に電卓を使うことが可能だ。各問題は、実生活で遭遇しそうな具体的な場面を設定し、そこで生じる課題を解決させる形になっている。…」とあり、以下に示すように問題は、内容によって大きく4種類に分かれる。

引用を続ける。「…

- ① 変化と関係：日本の単元では「代数」に近い。方程式や不等式を使って速度、時間、分量など互いの関係を明らかにする。
- ② 空間と形：「幾何」に近い。面積や体積などを測ったり、角度、長さなどを求めたりする。
- ③ 量：数の並び方のパターンを見つけ出したり、量の相対的な大きさを理解したりする。
- ④ 不確実性とデータ：「確率」「統計」に近い。統計データなどを読み解く。」

と区分されている。「…日本が不得意なのは③と④だ。日本の数学的リテラシー全体の平均点順位は7位だが、③は14位だった。11位だった03年に比べても落ちている。日本の授業では計算問題を解かせることが多く、数学や算数を実生活に応用して考えさせる機会が少ないことが背景にあるとみられる。③で正答率が低かった問題の一つは、船につけた帆に吹き込む風の速度を求める問題で、『現実世界で割合を計算する』のが出題の狙いである。日本の正答率は56.8%で、OECD加盟国(34カ国)平均の59.5%を下回った。④は7位だったが、平均点が低かった。①と②もともに7位だったが、これらは平均点が高く比較的得意といえる成績だった。…」とある。

以上の結果は多くの示唆をわれわれに与えてくれる。最初の量についての課題で、数の並び方のパターンを見つけ出したり、量の相対的な大きさを理解したりする。この課題であるが、『現実世界で割合を計算する』のが出題の狙いである」とある。「分数」の問題の理解が困難であるとの指摘³³⁾は何年も前からなされている。付随して「割合」に関する理解が当然困難であるのは理解できる。

「割合」の理解がやや理解が困難である点について概念的な私見を述べる。「数学は厳密な学問で正解は一つ」という幻想に呪縛されている学生の比率が多いのではないかと思える。多くの学生は「答えが一つである」という点に固執し「多くの選択肢がある」あるいは「答えは一つでない」というような問題に対しては、拒絶反応を呈する。一字一句が exact に一致しない時に不安を表明して、「曖昧さ」を許容することが出来ず、排除する傾向が強い。おおよそどの程度の大きさになるかという「概数」の把握が

むつかしい．この「概数」の概念を持ち合わせていれば、「分数」や「割合」の問題などにそれほど苦勞しなくても済みと考えられる．この「概数」の概念の理解は小学生には困難であるが、中学高学年、高校生にはそれほど困難とは思えない．芳沢の指摘³⁴⁾に「マークシート方式」の弊害が書かれているが、「マークシート方式」に習熟すると、「曖昧さ」を許容することが出来ず、排除する傾向が強くなると考えられる．単純に断定することが出来ないが、知識受容の際の「幅をもたせる」能力の養成も重要ではないかと考える．

不確実性とデータの問題、「確率」「統計」に近い．統計データなどを読み解く．これは最初の指摘である、「日本の授業では計算問題を解かせることが多く、数学や算数を実生活に応用して考えさせる機会が少ないことが背景にあるとみられる」が大きく影響していることが明白である．しかし、ITの学習活用の遅れも影響していると考えられる．「コンピュータで何をするかを聞いたところ、日本は『Eメール』『1人用ゲーム』が他国に比べて多かった。」との結果がでている．ネット上の統計データの活用が中学校段階ではまだ十分浸透していないようであり、「ビック データ」時代と称される時代を反映した統計学の基礎素養の早期教育での体制整備が急務となろう．

以上のPISA2012テストの結果から、若年層の「数理パズル脳」の育成が有効であると感じる．谷岡(2008)では、パズルを解くときの人間の脳の能力(パズル能力)を以下の6つに分類されている³⁵⁾．「ひらめき」「確率センスと計算力」「幾何と図形のセンス」「論理思考」「とんち力」および「総合的推理力」である．これらのパズル能力を錬成することで、「日本人中学生」の弱点のほとんどを補強しうる．これらの項目を授業に巧妙に導入することで、数理的問題を解く楽しみや数理的問題を解く過程の楽しみを少しでも増加させることが出来る．ここに「数理パズル」が活躍する余地がある．

5．おわりに

「パズル」は学習者の知的興味を惹起し、それを持続可能なものにすることに意義がある．また、「パズル」を解くだけでなく、「パズル問題の創出」という作業も知的能力を惹起させるという意味で有益であろう．知的刺激に対応して活動を明確にする部位の特定など、脳科学の近年におけるf-MRIなどによる画像解析による研究は、「教育神

経科学」の発展をもたらしつつある．その発展により多くの教育的手法の変革を提起され、効率的な学習法が提案されるようになってきた．「数理パズル」の利用に限定しても、問題の種類に対応していかなる脳部位が活性化するのかなどを計測することが可能となるであろう．これより、個別学習題材に対応した効率の良い学習・教育を実施でき、教育効果を一層向上させる可能性が秘められている．

ただ重要なことは脳画像解析の結果を盲信することなく、その成果に対して批判的にみることも重要である．例えば、「脳トレ」に対する坂井准教授の見解³⁶⁾「脳の同じ部位を繰り返し活動させれば、筋トレで筋肉をきたえるように、脳がきたえられて機能が向上するという証拠はなく、思い込みです．ちがう機能がはたらいているときでも、同じ部位の神経細胞が活動することはよくあります」とあり、測定の実現性に注意を払う必要がある．さらなる問題として³⁷⁾「脳は同じ課題を繰り返すと活動する領域が変化する」ことがあげられるという．「脳は、同じ動作に慣れてくると余計な活動をしなくなり、活動する量や領域が変わると考えられている．計算ドリルをやり始めた当初と、何週間も繰り返した後では、同じ領域が活動しているとは限らないのである」とある．計測装置の空間分解能と時間分解能に関する議論も重要である³⁸⁾．脳科学の研究は日進月歩であり、多数の知見がメディアに取り上げられる．しかし、「神経神話」³⁹⁾というものが数多く存在し、それらの知見を絶えず吟味して取り扱う必要がある．

次に教育に関連して「デジタル」と「アナログ」についての問題に触れる．最初に「デジタル」との関連から見よう．近年のデジタル機器およびデジタル技術の普及は教育に関する環境が大きく激変させようとしている．MOOC 革命という言葉⁴⁰⁾に代表されるように、無料オンライン授業が教育現場に大きな影響を与えている．また、デジタル機器を用いた研究もなされ「反転授業 (flipped teaching)」の一試行としてタブレット端末を用いた授業が実践され、アメリカでは数年にわたる研究で試験の点数が 5.1%、と 100 点満点で 5 点上昇という成果が報告されている⁴¹⁾．さらに、「人工知能」の研究は再び大活況を帯びている．知的作業の分担、事務労働 1 割を失うなどジョッキングな話題⁴²⁾を含んでいる．しかし、「人工知能」が仮に問題を解くことが出来ても、問題を創出するという知的作業を「人工知能」が代替できるようになるのはそんなに容易なことではない．大量のデータベースから類似の問題を見つけて「パズル」を解くことは可能になるかもしれないが、創造的な作業である「パズル」を考え出す作業を代替できるまでは、まだまだ時間を有し現在では夢物語であろう．

この「パズル」の創出作業は極めてアナログ的な作業であり、人間の知的能力の存在感を示している。「パズル」のもつアナログ的な側面は独特であり、デジタルに大きく依存しようとする人間の動向にある種の「待った」をかける「脱デジタル」的役割を果たしている。しかし、「アナログ」と「デジタル」両者を相互に排除することなく、否定的な立場から批判することなく、各々のメリット・デメリットを考量して「教育」の質向上への貢献の度合いの評価に重きを置き両者を融合した形で利用を図ることが今後一層重要となる。

以上より、以下の結論にまとめられる。

- ① 「数理パズル」の持つ効果は、教育上の問題に応用できる。脳科学、特に教育神経科学で得られた新しい学習法の成果を色々な形で導入し、教育法の改良を試みる必要がある。
- ② 「数理パズル」の持つアナログ的な側面と「デジタル」的な技術に依拠した教育法との併存による相乗効果により、より効果的な教育が可能になるであろう。

本考究は平成23-24年度アミューズメント産業研究所プロジェクト「(数理)パズルと教育」代表者 谷岡一郎教授の一環である。アミューズメント産業研究所所長をはじめとする同研究所スタッフにより物心両面で援助を受けた。ここに厚く御礼申し上げる。

〔注〕

- 1) 知識吸収型学習や創造型学習の明確な定義については触れない。ただ、知識吸収型学習に依拠したある程度の基礎的学力を保有していることが創造型学習を円滑に推進するためには必要である。つまり、「無から有は生じない」という点に注意を払う必要がある。
- 2) 本稿でパズルの定義を明確に行わない。ただ、数理的内容を重視したいわゆる数理パズルを念頭においている。また、一般的に流布している、謎解きやなぞなぞもパズルの一種として考えている。
- 3) パズル作成者と愛好者とは意味合いが異なる。またパズル作成者と愛好者が同時の場合もあり効能を厳密に区分するのが困難な場合もある。通常、パズルの作成は有能な作者の個人的努力に依拠することが多い。
- 4) 谷岡一郎(2008)では、よいパズルはエレガントなものという考えから古今東西の優れたパズル書から66題が厳選されている。パズルを解くときの人間の脳の能力(パズル能力)を以下の6つに分類されている。「ひらめき」「確率センスと計算力」「幾何と図形のセンス」「論理思考」「とんち力」および「総合的推理力」である。
- 5) 鹿島秀元「数理パズルー数学原理のトポロジカル変形」『大阪商業大学アミューズメント産業研究所紀要』第12号, 2010. pp.67-89.
- 6) 東田大志(2011) 日本で明確に「パズル学」を提唱した意欲的な著作である。

教育神経科学の進展と数理パズル

- 7) P. ウィンクラー (2011) で、翻訳書であるが、多くの数学パズルが掲載されている。著者自身のパズルへの思い入れ『頭脳や直感を磨き、ちょっとした日常問題から深い数学的問題にいたるまで、問題解決に必要な洞察力を養ってくれる』が込められている。
- 8) 本稿では、ゲームと関連付けた「脳トレーニング」などの脳内変化に着目した既存の成果よりもう少し精細な「脳内変化」に踏み込んだ考究に着目する。
- 9) OECD 研究革新センター編著 小泉英明監修 小山麻紀／徳山優子訳 (2010)
- 10) OECD 研究革新センター編著 小泉英明監修 小山麻紀訳 (2005)
- 11) 小泉英明編著 (2010)
- 12) OECD 研究革新センター編著 小泉英明監修 小山麻紀／徳山優子訳 (2010), pp.385-392.
- 13) OECD 研究革新センター編著 小泉英明監修 小山麻紀訳 (2005), p.6. 「例えば、生涯を通じて新しいことを学習する『脳の可塑性』についての新しい知見が今まで示されてきたことである」との記述がある。
- 14) 小泉英明編著 (2010), p.20.
- 15) この表現は単純化したものである。脳内ネットワークは極めて複雑であり、多くの部位が関連して活性化し、単純な入力・出力モデルで表現できない。例えば、視覚入力の処理でも極めて複雑である。マイケル・オーシェイ (2009), p.10によると「電気信号はニューロンとニューロン間の電気的伝達と化学伝達物質の放出との組み合わせによって、目が捉えた視覚イメージの情報のまず網膜で処理された後、視神経を通して脳に伝えられる」とある。
- 16) 小泉英明編著 (2010), p.10参照。
- 17) 「パズル」解決のプロセスはそれほど単純ではない。あくまで近似的な分解に過ぎない。厳密に言えば、脳イメージング機器を常時装着して時系列的に逐一観察することが必須であろう。しかし、放射線被爆などの健康の問題や空間的・時間的双方の高分解能を具備した脳イメージング機器等の現行での未実用化などの問題により、当面は切断面の測定に依拠せざるを得ない。
- 18) G. ポリヤ著／芳沢光雄訳『いかにして問題を解くか』丸善出版, 2011 (第11版)
- 19) 芳沢光雄著『いかにして問題を解くか 実践活用編』丸善出版, 2012, p.8.
- 20) 芳沢光雄著『いかにして問題を解くか 実践活用編』丸善出版, 2012, p.8.
- 21) 小泉英明編著, 仁木和久著 (2010)『ヒト行為の学習と記憶の脳科学』, p.38.
- 22) 小泉英明編著, 仁木和久著 (2010), pp.33-54.
- 23) 小泉英明編著, 仁木和久著 (2010), p.36.
- 24) 小泉英明編著, 仁木和久著 (2010), pp.37-39.
- 25) 坂井建夫・久光正監修『ぜんぶわかる 脳の事典』成美堂出版, 2011, pp.128-129.
- 26) スタニスラス・ドゥアンヌ著／長谷川真理子他訳『数覚とは何か?』早川書房, 2010.
- 27) OECD 研究革新センター編著 小泉英明監修 小山麻紀／徳山優子訳, 2010, p.152.
- 28) OECD 研究革新センター編著 小泉英明監修 小山麻紀／徳山優子訳, 2010, pp.153-154.
- 29) OECD 研究革新センター編著 小泉英明監修 小山麻紀／徳山優子訳, 2010, pp.153-154.
- 30) OECD 研究革新センター編著 小泉英明監修 小山麻紀／徳山優子訳, 2010, pp.154-155.
- 31) 2013年12月4日付35面朝日新聞朝刊記事による。
- 32) 2013年12月4日付34面朝日新聞朝刊記事による。
- 33) 岡部恒治・戸瀬信之・西村和雄著『分数ができない大学生』(新版) 筑摩書房, 2010.
- 34) 芳沢光雄 (2012), p.6に「記述式試験で育ってきた世代と、答えを当てればよいマークシート試験で育ってきた世代を比べてみると、『ふり返ってみること』すなわち見直すことに大きな違いを感じる。後者の世代の人たちには、答えが合っているか否かを自分で確かめることなく、直ぐに他人に確かめる傾向が顕著である。そして発表や伝達場で、重要な数値の桁が大きすぎていても不思議にならない面々も多々見受けられる」とある。
- 35) 谷岡一郎著『脳がよるこぶ思考力アップ! パズル』PHP 研究所, 2008, p.7.
- 36) 水谷仁編「知能と心の科学」『Newton 別冊』2013, p.135.
- 37) 水谷仁編「知能と心の科学」『Newton 別冊』2013, p.135.
- 38) OECD 研究革新センター編著 小泉英明監修 小山麻紀／徳山優子訳, p.385.

- 39) OECD 研究革新センター編著 小泉英明監修 小山麻紀／徳山優子訳, pp.169-195.
40) 金成隆一著 『MOOC 革命 無料オンライン授業の衝撃』岩波書店, 2013.
41) <http://www.theatlantic.com/technology/archive/2013/09/the-post-lecture-classroom-how-will-students-fare/279663/>
42) 2014年1月3日付朝日新聞朝刊記事(異才面談 国立情報学研究所教授 新井紀子さんの記事より)

参考文献

【単行本】

- ピータ・ウインクラー/坂井他訳『とっておきの数学パズル』日本評論社, 2011.
ピータ・ウインクラー/坂井他訳『続とっておきの数学パズル』日本評論社, 2011.
G. ポリヤ著／芳沢光雄訳『いかにして問題を解くか』丸善出版, 2011(第11版).
芳沢光雄著『いかにして問題を解くか 実践活用編』丸善出版, 2012.
谷岡一郎著『脳がよるこぶ思考力アップ! パズル』PHP 研究所, 2008.
東田大志著『パズル学入門』岩波書店, 2011.
田中一之著『チューリングと超パズル』とける問題ととけない問題, 東京大学出版会, 2013.
スタニスラス・ドゥアンヌ著/長谷川真理子他訳『数算とは何か?』早川書房, 2010.
OECD 研究革新センター編著 小泉英明監修 小山麻紀/徳山優子訳『脳から見た学習 新しい学習科学の誕生』明石書店, 2010.
OECD 研究革新センター編著 小泉英明監修 小山麻紀訳『脳を育む学習と教育の科学』明石書店, 2005.
小泉英明編著『脳科学と学習・教育』明石書店, 2010.
Tracy Tokunaga-Espinosa, "Mind, Brain, and Education Science", Norton & Company, 2011.
マイケル・オーシェイ著/山下博志訳『脳 A Very Short Introduction THE BRAIN』岩波書店, 2009.
坂井建夫・久光正監修『ぜんぶわかる 脳の事典』成美堂出版, 2011.
甘利俊一監修・田中啓治編『認識と行動の脳科学』東京大学出版会, 2008.
ラリー・R. スクワイア／エリック・R. カンデル著, 小西志朗／桐野豊監修『記憶のしくみ(上)』講談社, 2013.
安西祐一郎著『認識と学習』岩波科学ソフトウェア科学16, 岩波書店, 1989.
市川・伊東・渡邊・酒井・安西著『記憶と学習』岩波講座 認知科学 5 岩波書店, 1996.
市川伸一著『勉強法の科学』岩波科学ライブラリー211, 岩波書店, 2013.
波多野諄余夫・稲垣佳世子著『知的好奇心』中公新書318 中央公論社, 2009.
波多野諄余夫・稲垣佳世子著『人はいかに学ぶか』中公新書907 中央公論社, 1995.

【逐次刊行物】

- 水谷仁編『知能と心の科学』『Newton 別冊』2013.
日経サイエンス編集部編『心の成長と脳科学』『別冊日経サイエンス』No.193, 2013.
鹿島秀元『数理パズルー数学原理のトポロジカル変形』『大阪商業大学アミューズメント産業研究所 紀要』第12号, 2010, pp.67-89.

【追加資料】

- 本稿3節にて引用の, OECD 研究革新センター編著 小泉英明監修 小山麻紀／徳山優子訳『脳から見た学習 新しい学習科学の誕生』明石書店, 2010, pp.151-167, 内記載の関連文献出所一覧を参考のため下記に示す.
Piaget, J., *The Child's Conception of Number*, Norton, N.Y., 1952.
Ferigenson, L., S. Dehaene and E. Spelke, "Core Systems of Number", *Trends in Cognitive Neuroscience*, Vol. 8, No.7, 2004, pp.1-8.
Wynn, K., "Numerical Competence in Infants", in C. Donlan (ed.), *The Development of Mathematical Skills*, Psychology Press, East Sussex, UK, 1998, pp.1-25.
Siegler, R.S., "Implications of Cognitive Science Research for Mathematics Education", in

教育神経科学の進展と数理パズル

- J. Kilpatrick, W. B. Martin and D.E. Schifter (eds.), A Research Companion to Principles and Standards for School Mathematics, *National Council of Teachers of Mathematics*, Reston, VA, 2003, pp.219-233.
- Cantlon, J., E.Brannon, E.Carter and K.Pelphrey “ Functional Imaging of Numerical Processing in Adults and 4-y-old Children”, *PLoS Biology*, Vol. 4, No.5, 2006, pp.844-845.
- Xu, F.“Numerosity Discrimination in Infants: Evidence for Two Systems of Representations”, *Cognition*, Vol. 89, No.11, 2003, pp.15-25.